חלק ה

חשמל ומגנטיות





אלקטרוסטטיקה



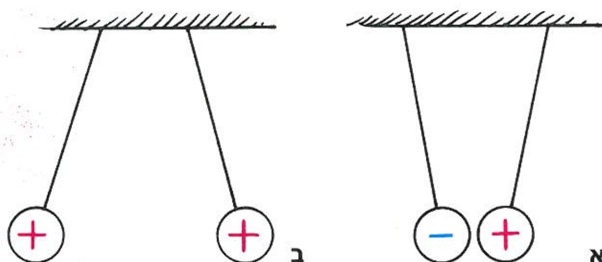
החשמל, בצורה זו או אחרת, נמצא בבסיסו של כמעט כל דבר סביבנו. החשמל נמצא בברק, הוא מסמר את שערות ראשנו כשאנו מסתרקים, והוא ה"דבק" המלכד אטומים למולקולות. השפעתו המכרעת של החשמל ניכרת בהתקנים טכנולוגיים מסוגים שונים, החל בנורות חשמל וכלה במחשבים. בעידן הטכנולוגי שאנו נמצאים בו, חשוב שנבין את היסודות של תורת החשמל, וכיצד יישומם של יסודות אלו מאפשר את השגשוג חסר התקדים המאפיין את תקופתנו.

בפרק זה נחקור את החשמל במצב מנוחה, נושא שנקרא בלועזית **אלקטרוסטטיקה** (סטטי פירושו יציב, שרוי במנוחה). תחום זה עוסק במטענים חשמליים, בכוחות הקיימים ביניהם, בהילה הסובבת אותם ובהתנהגותם בתוך חומרים. בפרק הבא נחקור את תנועתם של המטענים החשמליים, כלומר את הזרמים החשמליים, את המתחים שיוצרים זרמים אלו, וכיצד ניתן לשלוט בהם. בפרק 23 נלמד על הקשר בין זרמים חשמליים לבין מגנטיות, ובפרק 24 נלמד כיצד ניתן להשתמש בשילוב של זרמים חשמליים ומגנטיות כדי לבנות מנועים והתקנים חשמליים אחרים.

הבנתה של תורת החשמל דורשת גישה של צעד אחר צעד, הואיל וכל מושג משמש בסיס להבנתו של המושג הבא אחריו. לכן, חשוב שתקדישו תשומת לב רבה במיוחד ללימוד החומר הזה. אם תנסו ללמוד אותו בפזיזות הוא יהיה קשה, מבלבל ומתסכל. לעומת זאת, השקעת מאמץ בלימוד תהפוך את החומר למובן ומעניין. נצא איפוא לדרך!

כוחות חשמליים

נסו לתאר לעצמכם כוח חובק עולם ככוח המשיכה, שעוצמתו קטֵנה ביחס הפוך לריבוע המרחק, אולם הוא חזק מכוח המשיכה פי מיליארדים רבים. אילו היה כוח כזה קיים, ואם היה זה כוח מושך, היקום כולו היה מתכווץ לכדור צפוף, שבו היה כל החומר שביקום דחוס בשיעור מרבי. אם, לעומת זאת, היה הכוח הזה כוח דוחה דווקא, וכל חלקיק היה נדחה ומתרחק ממשנהו, מה היה קורה אז? במקרה כזה היה היקום כולו עננת גזים המתפשטת והולכת במרחב לנצח. אך, תארו לעצמכם עולם המורכב מחלקיקים דוחים ומחלקיקים מושכים כאחד - נאמר, חלקיקים חיוביים וחלקיקים שליליים. נניח שחלקיקים חיוביים דוחים חלקיקים חיוביים אחרים ומושכים חלקיקים שליליים, ואילו חלקיקים שליליים דוחים חלקיקים שליליים אחרים ונמשכים אל החלקיקים החיוביים. במילים אחרות: חלקיקים דומים נדחים זה מזה וחלקיקים שונים מושכים זה את זה (איור 21.1). תארו לעצמכם גם שמספריהם של החלקיקים מכל סוג שווים. כיצד היה נראה העולם אז? התשובה פשוטה: הוא היה נראה בדיוק כמו העולם שאנו מכירים. וזאת, מפני שכוח כזה אכן קיים בעולמנו. אנו קוראים לו הכוח החשמלי.



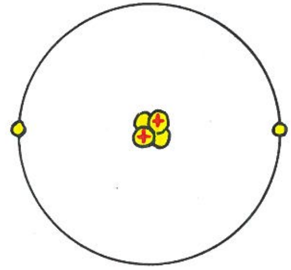
איור 21.1
(א) מטענים שונים מושכים זה את זה.
(ב) מטענים דומים דוחים זה את זה.

צבירים של חלקיקים חיוביים ושליליים נאספו יחדיו עקב כוחות המשיכה החשמליים האדירים. התוצאה היא, שכוחות עצומים אלו התאזנו על ידי יצירת קבוצות מרוכזות של חלקיקים שליליים וחיוביים מעורבים אלו באלו במספרים שווים. יתרה מזאת, בין כל שתי קבוצות כאלה אין למעשה שום כוח חשמלי: לא משיכה ולא דחייה. כל כוח חשמלי בין הארץ לירח, למשל, מתאפס בדרך זאת. כך הופך כוח המשיכה הכבידתי, החלש בהרבה, לכוח היחיד ששני גרמי שמים אלו מפעילים זה על זה.

מטענים חשמליים

המונחים חיובי ושלילי מתייחסים למטען החשמלי. מטען חשמלי הוא הגודל היסודי ביותר, העומד בבסיסה של כל תופעה חשמלית. לפרוטונים מטען חשמלי חיובי, ואילו לאלקטרונים מטען חשמלי שלילי. כוח המשיכה החשמלי שבין אלקטרונים לפרוטונים מחזיק את האטומים יחדיו (איור 21.2). לעיתים קורה, שהאלקטרונים השליליים של אטום אחד קרובים יותר לפרוטונים החיוביים של אטום שָכֵן מאשר לפרוטונים של האטום "שלהם". במקרה כזה, הכוח המושך בין המטענים הללו גדול מהכוח הדוחה, והאטומים יוצרים מולקולה. למעשה, כל הכוחות הכימיים הקושרים בין אטומים שונים ויוצרים

מהם מולקולות אינם אלא כוחות חשמליים. כוחות אלו באים לידי ביטוי באזורים מצומצמים בלבד סביב המטענים, שבהם האיזון בין המטענים החיוביים והשליליים אינו מושלם. אם יש בדעתכם ללמוד כימיה, עליכם לדעת תחילה משהו על חשמל, ולפני שלומדים על החשמל, צריך להכיר את האטומים. להלן כמה עובדות חשובות שיש לדעת על האטומים:



איור 21.2
מודל של אטום הליום. גרעין האטום עשוי משני פרוטונים ושני ניטרונים. הפרוטונים בעלי המטען החיובי מושכים את האלקטרונים בעלי המטען השלילי.

1. כל אטום מורכב מגרעין בעל מטען חשמלי חיובי, שמסביבו מפוזרים מספר אלקטרונים שלהם מטען חשמלי שלילי.
2. האלקטרונים בכל האטומים זהים זה לזה. לכולם כמות שווה של מטען חשמלי ומסות שוות.
3. הגרעין מורכב מפרוטונים ומניטרונים. (הצורה השכיחה של אטום המימן, שאינו מכיל ניטרונים, היא החריגה היחידה מכלל זה.) המסה של פרוטון גדולה כמעט פי 2000 ממסת האלקטרון, אך שיעור המטען החשמלי החיובי שנושא הפרוטון שווה בדיוק למטען החשמלי השלילי שנושא האלקטרון. לניטרונים מסה גדולה במעט ממסת הפרוטון, והם אינם טעונים במטען חשמלי.
4. מספר האלקטרונים שסובבים סביב הגרעין בכל אטום רגיל שווה בדיוק למספר הפרוטונים המצויים בגרעינו של אותו אטום. לפיכך, באטום רגיל, סך כל המטען החשמלי הוא אפס.

מדוע אין הפרוטונים מושכים את האלקטרונים, שטעונים במטען הפוך, אל תוך הגרעין? לפני כ-80 שנה הוצעה לשאלה זו תשובה פשוטה: האלקטרונים אינם נמשכים אל תוך הגרעין כפי שכדור הארץ וכוכבי הלכת אינם נמשכים לתוך השמש. כלומר: האלקטרונים מוחזקים במסלוליהם עקב משיכתם של הפרוטונים. תמונה זו אמנם לוקה בפשטנות יתרה, אולם היא יכולה לשמש בסיס סביר להבנת האופי החשמלי של האטומים. למעשה, המושג מסלול (או המושג הקרוב לו בלועזית אורביטל) נמצאים עדיין בשימוש, אף כי אולי עדיפה המילה קליפה, מפני שהאלקטרונים, להבדיל מכוכבים, אינם נעים במישור אחד. כיום ידועה התשובה לשאלה מדוע האלקטרונים אינם קורסים אל תוך הגרעין, והיא קשורה לאופי הגלי של אלקטרונים ולתורת הקוונטים, שבה נדון בפרק 30.

מדוע אין הפרוטונים המרכיבים את הגרעין דוחים זה את זה ואינם עפים הרחק זה מזה? מה מחזיק את הגרעין כגוף אחד? התשובה היא, כי בנוסף לכוחות הדחייה החשמליים, פועלים בגרעין גם כוחות משיכה לא חשמליים. כוחות אלו חזקים דיים כדי להחזיק את הגרעין כגוף אחד חרף הדחייה החשמלית החזקה בין הפרוטונים. נחזור לטפל בעניין זה בפרק 32.

שימור המטען

באטום ניטרלי מספר הפרוטונים והאלקטרונים שווה, כך שבסך הכל אין לאטום מטען חשמלי. המטענים השליליים מאזנים את המטענים החיוביים במדויק. אם אלקטרון מורחק מאטום, האטום איננו ניטרלי עוד. יש לו מטען חיובי (פרוטון) אחד עודף על המטענים השליליים (האלקטרונים), ואנו אומרים שהוא טעון במטען חיובי. אטום טעון נקרא יון. ליון חיובי יש מטען חשמלי חיובי. יון שלילי, אטום בעל עודף של אלקטרון אחד או יותר, טעון במטען חשמלי שלילי.



איור 21.3
אלקטרונים מועברים מהפרווה למוט. המוט טעון אז במטען שלילי. האם הפרווה טעונה? באיזו מידה, יחסית למוט? האם מטען הפרווה חיובי או שלילי?

גופים חומריים עשויים מאטומים, כלומר, הם בנויים מפרוטונים ומאלקטרונים (כמו גם מניטרונים). גופים מכילים בדרך כלל מספר שווה של אלקטרונים ושל פרוטונים, ולפיכך הם ניטרליים מבחינה חשמלית. אך אם יש חוסר איזון קל בין המספרים, הגוף טעון במטען חשמלי. חוסר איזון כזה נוצר כאשר אלקטרונים מוספים לגוף או מורחקים ממנו. אף שהאלקטרונים הפנימיים ביותר באטום קשורים אל הגרעין בקשר חזק ביותר, הרי שבאטומים רבים, האלקטרונים הרחוקים ביותר מהגרעין קשורים אליו בצורה רופפת למדי, וניתן להרחיקם בקלות יחסית. שיעור העבודה שיש להשקיע כדי לקרוע אלקטרון מהאטום שלו ולהפריד ביניהם תלוי בסוג החומר. האלקטרונים מוחזקים חזק יותר באטומים המרכיבים גומי או פלסטיק, למשל, מאשר באטומים שמהם מורכבות שערות ראשכם. לכן, כאשר מסרק עובר בשערך, אלקטרונים עוברים מהשיער למסרק. במסרק נוצר אז עודף של אלקטרונים ואומרים עליו שהוא טעון במטען שלילי. בשיער, לעומת זאת, נוצר חוסר באלקטרונים, והוא טעון במטען חיובי. אם נשפשף בד משי במקל זכוכית או פלסטיק, נגלה שהמקל נטען במטען חיובי. למשי זיקה גדולה יותר לאלקטרונים משיש למקל הפלסטיק או הזכוכית. אלקטרונים "מגורדים" מהמקל ועוברים למשי.

נמצאנו למדים שגוף טעון במטען חשמלי אם מספר האלקטרונים שבו שונה ממספר הפרוטונים. אם יש בו עודף אלקטרונים על פרוטונים, מטענו שלילי, ואם מספר האלקטרונים פחות ממספר הפרוטונים, מטענו חיובי.

חשוב לציין, שכאשר אנו טוענים גוף כלשהו, אלקטרונים אינם נוצרים או מושמדים. אלקטרונים פשוט עוברים מגוף אחד למשנהו. המטען הכולל נשמר. בכל מאורע, בין אם הוא מתרחש בינות לכוכבים ובין אם ברמה האטומית או הגרעינית, נמצא שעקרון שימור המטען מתקיים תמיד. מעולם לא אותר מקרה שבו נוצר מטען או נעלם. עקרון שימור המטען עומד בבסיסה של הפיסיקה יחד עם עקרונות השימור של האנרגיה והתנע.

לכל גוף טעון חשמלית יש, אם כן, עודף או חוסר באלקטרונים. פירושו של דבר, שמטענו של כל גוף הוא כפולה שלמה של מטען האלקטרון. גוף אינו יכול להיות בעל מטען של חצי אלקטרון או של 1000.5 אלקטרונים, למשל. גוף טעון מכיל תמיד מספר שלם של מנות מטען בסיסיות (בלועזית: קוונטים של מטען). תופעה זו נקראת הקוונטיזציה של המטען. מנת המטען הבסיסית היא מטענו של האלקטרון (או הפרוטון). פרט לקוורקים, שתמיד מופיעים בקבוצות, מעולם לא נמצא חלקיק שטעון במטען קטן יותר*.

שאלה אתם גוררים את רגליכם על השטיח, ואלקטרונים "נתלשים" מכף הרגל. האם אתם טעונים במטען חיובי או שלילי?

תשובה: מספר האלקטרונים בגופכם פחת אחרי גרירת הרגליים, ומכאן שמטענכם החשמלי חיובי (והשטיח נטען שלילית).

---

* לעומת זאת, בתוך הפרוטונים והניטרונים של גרעיני האטומים קיימים חלקיקים שנקראים קוורקים, ומטענם החשמלי הוא $\pm\frac{1}{3}$ או $\pm\frac{2}{3}$ ממטען האלקטרון. נראה שחלקיקים אלו מופיעים תמיד בקבוצות שמטענן הכולל הוא כפולה שלמה של מטענו של אלקטרון אחד, או בקבוצות שמטענן הכולל הוא אפס.

חוק קולון

הכוח החשמלי, בדומה לכוח המשיכה, נחלש ביחס הפוך לריבוע המרחק בין המטענים. כלל זה התגלה במאה ה-18 על ידי שארל קולון (Charles Coulomb) ונקרא, על-כן, **חוק קולון**. חוק זה תקף לגבי גופים שמרחקם זה מזה גדול בהרבה מגודלם. במקרים כאלה, הכוח החשמלי נמצא ביחס ישר למכפלת המטענים של הגופים וביחס הפוך לריבוע המרחק שביניהם. ניתן לבטא את חוק קולון בנוסחה:

$$F = k\,\frac{q_1 q_2}{d^2}$$

באשר d הוא המרחק בין החלקיקים הטעונים, q_1 מייצג את גודל המטען של אחד החלקיקים, q_2 את המטען של החלקיק האחר, ו-k הוא קבוע מתכונתיות.

יחידת המטען נקראת **קולון**, ובקיצור מסומנת באות ק'. כאשר הצליחו למדוד את המטען של אלקטרון בודד, התברר שקולון אחד שווה למטענם של 6.25 מיליארד מיליארדים אלקטרונים. מספר זה של אלקטרונים אולי נראה עצום, אך זו כמות המטען שעוברת בנורה רגילה בת 100 ואט במשך מעט יותר משנייה אחת.

הקבוע k בחוק קולון דומה לקבוע G בחוק הכבידה של ניוטון. אך בניגוד ל-G, שהוא מספר זעיר (6.67×10^{-11}), קבוע המתכונתיות החשמלי הוא מספר גדול מאוד. בקירוב

$$k = 9{,}000{,}000{,}000\ \frac{\text{נ'}\cdot\text{מ'}^2}{\text{ק'}^2}$$

או, בכתיב מדעי: $k = 9\times10^9$ נ·מ²\ק². היחידות נ·מ²\ק² אינן בעלות חשיבות מרכזית לצורך הדיון שלנו כאן, אלא פשוט הופכות את היחידות באגף הימני של המשוואה ליחידות הכוח - ניוטון (נ'). העניין החשוב הוא גודלו האדיר של הכוח. אם, למשל, שני חלקיקים בעלי מטען שווה של קולון אחד יימצאו במרחק של מטר זה מזה, יהיה ביניהם כוח של תשעה מיליארד ניוטון*. כוח זה שווה ליותר ממשקלן של עשר ספינות קרב! כמויות כאלה של מטענים בלתי מאוזנים כמובן אינן קיימות בסביבתנו היומיומית.

לפיכך, חוק קולון למטענים חשמליים דומה לחוק הכבידה של ניוטון למשיכה בין מסות**. אך בעוד כוח המשיכה הכבידתי בין חלקיקים כמו

---

* השוו כוח זה לכוח הכבידה שפועל בין שתי יחידות מסה (קילוגרם) שעומדות במרחק של מטר אחד זו מזו: 6.67×10^{-11} נ'. זהו כוח קטן להפליא. כדי שהכוח בין שתי מסות המרוחקות זו מזו מטר אחד יהיה ניוטון אחד, על המסות להיות בנות 123,000 ק"ג כל אחת. לפיכך, כוחות כבידה הפועלים בין שני חפצים רגילים הם קטנים עד מאוד, ואילו כוחות חשמליים (שאינם מתבטלים) בין חפצים רגילים הם גדולים ביותר. איננו חשים בכוחות האדירים הללו מכיוון שבדרך כלל המטענים החיוביים והשליליים מאזנים זה את זה. אפילו לגבי גופים טעונים, חוסר האיזון בין מספרי הפרוטונים למספרי האלקטרונים הוא פחות מאחד למיליון מיליארדים.

** הדמיון בין שני חוקים אלו גרם לכמה אנשים לחשוב שהם מתארים שני פנים של אותה תופעה. אחד מהם היה אלברט איינשטיין, שבילה את שנותיו האחרונות בחיפוש אחר "תיאורית איחוד הכוחות", אך ללא הצלחה. לאחרונה, אוחד הכוח החשמלי עם אחד מהכוחות הגרעיניים, הכוח החלש, הפועל בהתפרקויות רדיואקטיביות מסוימות. פיסיקאים עדיין מחפשים דרך לאחד את הכוח החשמלי עם הכבידה.

אלקטרון ופרוטון קטן להפליא, הרי שהכוח החשמלי ביניהם הוא אדיר. ההבדל העיקרי בין הכוח החשמלי לבין כוח הכבידה הוא שכוח הכבידה הוא תמיד כוח משיכה, ואילו כוחות חשמליים יכולים להתבטא במשיכה או בדחייה.

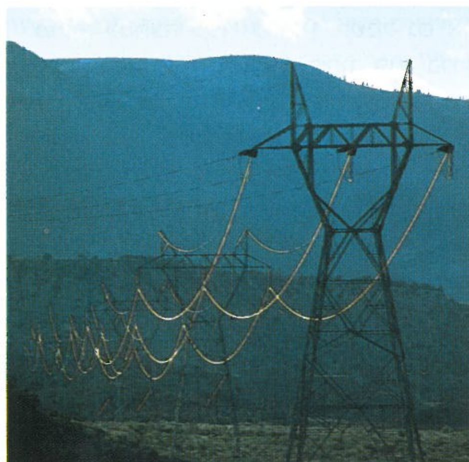
שאלות

1. הפרוטון שמהווה את הגרעין של אטום המימן מושך אליו את האלקטרון הסובב אותו. האם האלקטרון מושך את הפרוטון בכוח גדול יותר, קטן יותר, או באותו כוח?
2. אם פרוטון נדחה בכוח מסוים מחלקיק טעון, פי כמה ייחלש כוח זה אם הפרוטון יתרחק מהחלקיק הטעון למרחק גדול פי שלושה? ואם המרחק בין השניים יגדל פי חמישה?
3. האם מטענו של החלקיק בשאלה הקודמת חיובי או שלילי?

מוליכים ומבדדים

מתכות מסוימות מוליכות היטב חשמל, מפני שאלקטרון אחד או יותר בקליפתם החיצונית של האטומים, שמהם עשויה המתכת, אינם קשורים בחוזקה לאטום מסוים, אלא חופשיים לנדוד ברחבי הגוף המתכתי. גופים כאלו נקראים **מוליכים** טובים. אותן מתכות הן מוליכות טובות של חשמל בשל אותה סיבה שהן מוליכות טובות של חום: אלקטרונים בקליפה החיצונית של האטומים שלהן "חופשיים".

האלקטרונים בחומרים אחרים, גומי וזכוכית, למשל, קשורים בחוזקה ושייכים לגרעינים של אטומים מסוימים. אלקטרונים אלו אינם חופשיים לנוע בקרבת אטומים אחרים בחומר. חומרים כאלו הם מוליכי חשמל גרועים בשל אותה סיבה שהם מוליכי חום גרועים. חומרים כאלו נקראים **מבדדים** טובים.



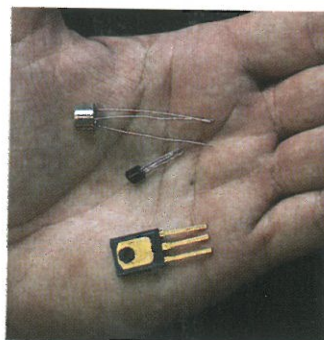
איור 21.4
לחשמל קל יותר לזרום דרך מאות קילומטרים של תילי מתכת מלעבור דרך סנטימטרים אחדים של חומר מבדד.

תשובות:

1. האלקטרון מושך את הפרוטון בכוח שווה לזה שבו הפרוטון מושך את האלקטרון, בהתאם לחוק השלישי של ניוטון. זו מכניקה בסיסית! זיכרו שכוח הוא תמיד פעולת גומלין בין שני גופים, במקרה זה בין פרוטון לאלקטרון, המושכים זה את זה בכוח שווה.
2. במקרה הראשון הכוח ייחלש פי 9 מעוצמתו המקורית; במקרה השני הוא ייחלש פי 25.
3. חיובי.

ניתן לסווג את כל החומרים בהתאם ליכולתם להוליך מטענים חשמליים. אלו שיעמדו בראש הרשימה יהיו המוליכים, ואלו שבתחתיתה - המבדדים. קצות הרשימה רחוקים מאוד זה מזה. מוליכות של מתכת, למשל, יכולה להיות גדולה ממוליכות של מבדד כמו זכוכית פי מיליארד מיליארדי פעמים. בכבל חשמל רגיל, למשל, המטען החשמלי "מעדיף" לזרום לאורך מטרים רבים של מתכת, מאשר לעבור ישירות מתיל אחד למשנהו מרחק הקטן ממילימטר, שאותו עליו לעשות בתוך הגומי המבדד.

מוליכים למחצה



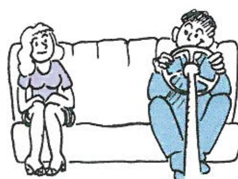
איור 21.5
טרנזיסטורים.

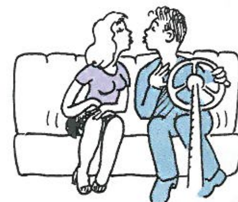
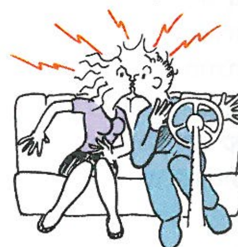
חומר מסווג כמוליך או כמבדד בהתאם לעוצמה שבה קושרים אטומי החומר את האלקטרונים שלהם. חומרים מסוימים, כמו גרמניום וצורן (סיליקון), הם בעלי מוליכות חשמלית בינונית: הם אינם מוליכים טובים וגם אינם מבדדים טובים. חומרים אלו הם מבדדים טובים למדי במצבם הגבישי הטהור, אך יכולתם להוליך חשמל עולה במידה ניכרת אם מחליפים בהם אפילו אחד מכל עשרה מיליון אטומים בסיג (אילוח) - אטום זר שמוסיף או גורע אלקטרון ממבנהו של הגביש. את החומרים האלו ניתן לנצל לעיתים כמבדדים ולעיתים כמוליכים, והם נקראים **מוליכים למחצה**. כריכים של שכבות דקות של מוליכים למחצה מסוגים שונים מהווים טרנזיסטורים. טרנזיסטורים משמשים לבקרה של זרימת מטענים במעגלים חשמליים, לגילוי ולהגברה של אותות רדיו, וליצירת תנודות חשמליות במשדרים. טרנזיסטורים משמשים גם כמתגים ספרתיים (דיגיטליים, איור 21.5). מוצקים קטנטנים אלו היו הרכיבים האלקטרוניים הראשונים שבהם חוברו חומרים בעלי אופי חשמלי לא באמצעות תילי חשמל, אלא ישירות למבנה אחד. הם צורכים הספק קטן מאוד, ובשימוש רגיל יכולים להחזיק מעמד זמן בלתי מוגבל.

מוליך למחצה עשוי להוליך חשמל גם אם מאירים אותו באור בצבע מתאים. לוח העשוי מסלניום טהור הוא בדרך כלל מבדד טוב, וכל מטען חשמלי שיגיע אל פניו יישאר שם זמן רב, כל עוד הלוח מוחזק בחושך. אך עם חשיפתו לאור, המטען "נספג" במהירות מפני הלוח אל תוכו. כאשר חושפים לוח סלניום טעון לתבנית מסובכת של אור וחושך, כמו למשל לתבנית המודפסת על עמוד זה, המטען ייבלע רק מהמקומות שנחשפו לאור. אם נפזר עתה אבקה שחורה של חומר פלסטי על פני הלוח, האבקה תידבק רק למקומות הטעונים שבהם לא נחשף הלוח לאור. כעת, אם נניח על הלוח הזה גיליון נייר, שצידו האחורי טעון כולו במטען חשמלי, האבקה השחורה תידבק לנייר ותיצור את דמותה של התבנית המקורית, למשל זו המודפסת על העמוד הזה. אם כעת נחמם את הנייר כדי שאבקת הפלסטיק תינתך ותידבק אליו, אתם עשויים להתבקש לשלם אגורות אחדות עבור התוצאה, שאותה אנו מכנים תצלום-מסמך של העמוד הזה.

טעינה

אנחנו טוענים גופים על ידי העברת אלקטרונים ממקום למקום. אנו יכולים לעשות זאת על ידי מגע ממשי, כפי שקורה כאשר חומרים שונים מתחככים זה בזה, או בדרך של הבאת מטענים לקרבת הגוף הנטען - תהליך הנקרא טעינה על ידי השראה.



איור 21.6
טעינה במגע.

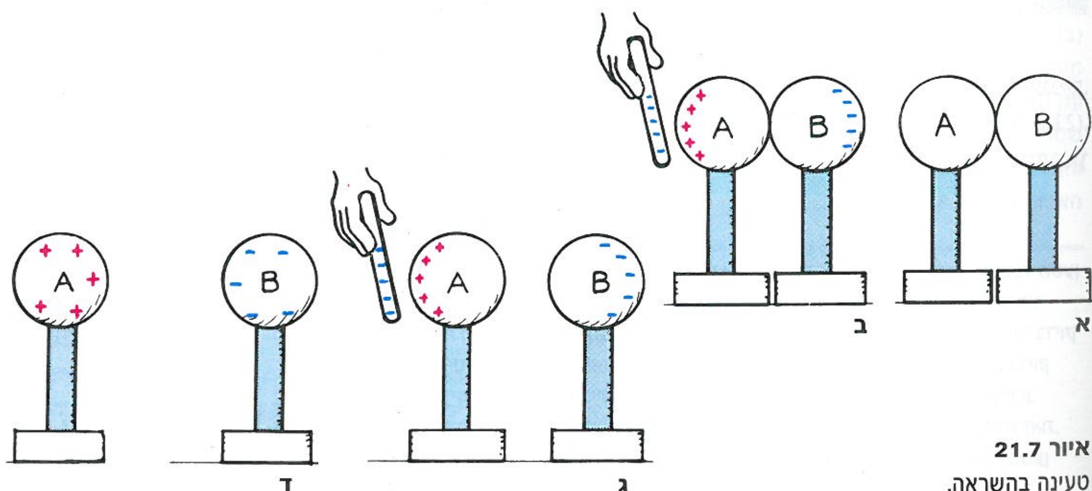
טעינה במגע

כולנו מכירים את ההשפעה החשמלית שיש לחיכוך של גופים זה בזה. אנו מלטפים שיער של חתול ושומעים את פצפוצי הניצוצות שנוצרו; אנחנו מסרקים את השיער, בעיקר בחדר חשוך מול הראי, וכך יכולים גם לראות, ולא רק לשמוע, את ניצוצות החשמל; או שאנו מתחככים בכיסוי הפלסטי של מושב המכונית ומרגישים ב"מכת חשמל" כשאנו מקרבים את היד למשטח מתכתי (איור 21.6). בכל המקרים הללו אלקטרונים מועברים כתוצאה מהמגע הקרוב שנוצר בין שני גופים המתחככים זה בזה. זאת **טעינה במגע**.

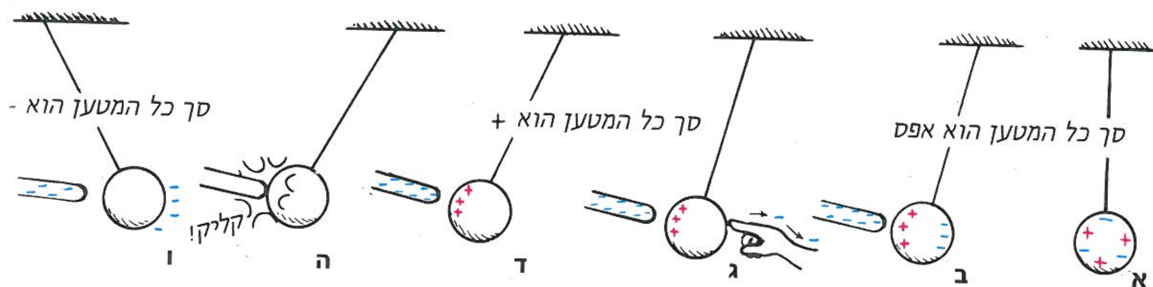
אלקטרונים יכולים לעבור מגוף אחד למשנהו גם במגע פשוט, ללא חיכוך. מוט מוליך וטעון הנוגע בגוף שאינו טעון, יעביר מטען אל הגוף הניטרלי. אם הגוף הוא מוליך טוב, המטענים יתפזרו במהירות על כל שטחו, מכיוון שהמטענים הדומים דוחים זה את זה. אם הגוף הוא מבדד, נצטרך לגעת בו במספר מקומות כדי לקבל פיזור אחיד, פחות או יותר, של המטען. מטען עובר, איפוא, מגוף אחד למשנהו גם במגע קל בלבד.

טעינה בהשראה

אם נשים גוף טעון בקרבת משטח מוליך, נשרה בכך תנועה של אלקטרונים בתוך החומר המוליך, גם בהעדר מגע בין השניים. זוהי **טעינה בהשראה**. נתבונן בשני כדורי המתכת המבדדים A ו-B שבאיור 21.7. (א) הם נוגעים זה בזה ובכך מהווים, למעשה, מוליך אחד ובלתי טעון. (ב) כאשר מוט בעל מטען שלילי מובא בסמוך ל-A, מטענים חיוביים בתוך המתכת נמשכים לעבר המוט, ומטענים שליליים נדחים ממנו. דבר זה יוצר חלוקה חדשה של המטען. (ג) אם נפריד עתה בין הכדורים A ו-B, מבלי להרחיק עדיין את המוט הטעון, (ד) יימצא על כל אחד מהם מטען השווה בגודלו ומנוגד בסימנו למטען שעל הכדור האחר. הכדורים נטענו באמצעות השראה. המוט הטעון מעולם לא נגע בהם, והמטען שעליו נותר בדיוק כשהיה מלכתחילה.



איור 21.7
טעינה בהשראה.



איור 21.8
השראת מטען על ידי הארקה. (א) סך כל המטען על כדור המתכת הוא אפס. (ב) נוכחותו של המוט הטעון משרה סידור מחדש של המטענים. סך כל המטען הוא עדיין אפס. (ג) נגיעה בצידו השלילי של הכדור מרחיקה ממנו אלקטרונים על ידי מגע. (ד) כך נשאר הכדור כשהוא טעון חיובית. (ה) הכדור נמשך ביתר חוזקה אל המוט השלילי, וכאשר הם נוגעים זה בזה מתרחשת טעינה במגע. (ו) הכדור השלילי נדחה מהמוט, שעדיין טעון במידת מה במטען שלילי.

באופן דומה נוכל לטעון כדור מתכת יחיד אם ניגע בו כאשר מושרית בו הפרדת מטענים. נתבונן בכדור מתכת התלוי בחוט מבדד, כדוגמת זה שבאיור 21.8. כאשר אנחנו נוגעים באצבע בחלק הטעון של פני המתכת, נוצר מסלול מוליך למטענים הדוחים זה את זה אל מאגר עצום של מטען חשמלי: הקרקע. לתהליך הפריקה של מוליך בנגיעה או על ידי יצירת חיבור בינו לבין הקרקע אנו קוראים הארקה. נחזור לרעיון זה של הארקה בפרק הבא, כשנדון בזרמים חשמליים.

שאלות

1. האם המטען המושרה בכדורים A ו-B שבאיור 21.7 הוא בהכרח שווה בגודלו ומנוגד בסימנו?
2. מדוע יש למוט שבאיור 21.7 מטען שווה לפני טעינת הכדורים ואחריה, אך לא כן למוט שבאיור 21.8?

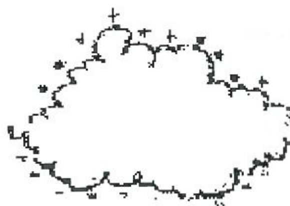
טעינה באמצעות השראה מתרחשת במהלך סופת רעמים. תחתית העננים, הטעונה שלילית, משרה מטען חיובי על פני הקרקע שמתחתיהם (איור 21.9). הראשון שהדגים זאת היה בנג'מין פרנקלין, שהוכיח, בניסוי העפיפון

תשובות:

1. המטענים על שני הכדורים חייבים להיות מנוגדים בסימנם ושווים בדיוק בגודלם, מפני שכל מטען חיובי על פני כדור A הוא תוצאה של מעבר של אלקטרון אחד מ-A ל-B. הרי זה כמו להסיר אריחים ממדרכה מרוצפת ולהניחם על הגדר שלצידה. מספר האריחים על הגדר יהיה שווה בדיוק למספר החללים שבמדרכה. בדומה לכך, מספר האלקטרונים העודפים על B יהיה שווה בדיוק למספר ה"חורים" (מטענים חיוביים) על A. נזכור שמטען חיובי כמוהו כחוסר של אלקטרון.
2. בתהליך הטעינה שבאיור 21.7 לא נוצר מגע בין המוט הטעון לבין אחד מהכדורים. לעומת זאת, באיור 21.8 המוט נגע בכדור, שהיה טעון במטען חיובי. מעבר מטען במגע הפחית את המטען השלילי שעל המוט.

המפורסם שערך, כי ברק הוא תופעה חשמלית*. ברק הוא התפרקות חשמלית בין העננים לקרקע, שטעונה במטען נגדי, או בין עננים שונים הטעונים במטענים הפוכי סימן.

פרנקלין גילה גם שמטען דולף דרך קצוות חדים, וכך המציא את קולט הברק ("כליא-ברק") הראשון. אם מוט מתכת מוצב על ראש בניין ומחובר לקרקע, המטען דולף ואינו מצטבר. דליפה רצופה זו של מטען לקרקע מונעת מהמבנה להיטען בהשראה מן העננים במטען גדל והולך. בלעדיה, היתה מתרחשת התפרקות מטען פתאומית בין המבנה הטעון ובין הענן, ובמילים אחרות - מכת ברק. מטרתו העיקרית של קולט הברקים היא למנוע התרחשותה של מכת ברק. אם מצטברת בענן כמות של מטען שדי בה לחולל התפרקות חשמלית לעבר הבניין (כלומר: אם ברק פוגע בבניין), הברק יפגע בקולט הברקים וימשיך בדרכו דרך החיבור של מוט הקולט לעבר הקרקע, במקום לפגוע בבניין עצמו. ובסך הכל, מטרתו של קולט הברקים היא למנוע פריצת אש כתוצאה מפגיעת הברק.

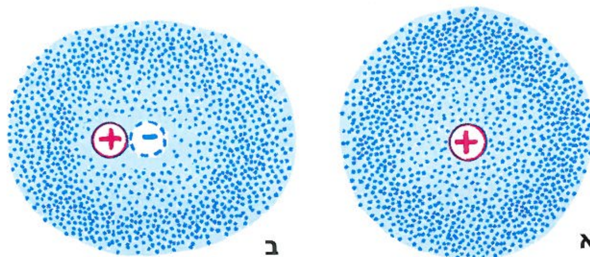




איור 21.9
תחתיתו של הענן הטעון שלילית משרה מטען חיובי על פני הקרקע שמתחתיו.

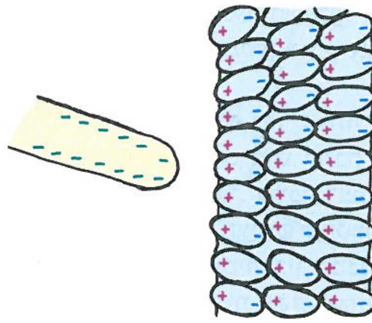
קיטוב מטען

טעינה בהשראה אינה מוגבלת למוליכים בלבד. אמנם, כאשר מקרבים מוט טעון לעבר גוף מבדד, אין מטענים חופשיים שיכולים לנוע דרך החומר המבדד. אולם, מתרחש ארגון מחדש במיקומם של המטענים בתוך האטומים והמולקולות עצמם (איור 21.10). בצידם האחד של האטום או המולקולה מושרה עודף של מטען שלילי (או חיובי) ביחס לצד הנגדי. במקרה כזה אומרים שהאטום או המולקולה **מקוטבים חשמלית**. אם, למשל, המוט טעון במטען שלילי, אזי הצד החיובי של האטום או המולקולה נמשך לעבר המוט הטעון, ואילו חלקם השלילי נדחה לצד המרוחק מהמוט. החלקים השליליים



איור 21.10
(א) מרכזו של ענן האלקטרונים השלילי חופף את מרכזו של הגרעין החיובי. (ב) כאשר מטען שלילי חיצוני מובא לקרבת האטום משמאל, ענן האלקטרונים מתעוות, כך שמרכזי המטענים, החיובי והשלילי, אינם חופפים עוד. האטום מקוטב חשמלית.

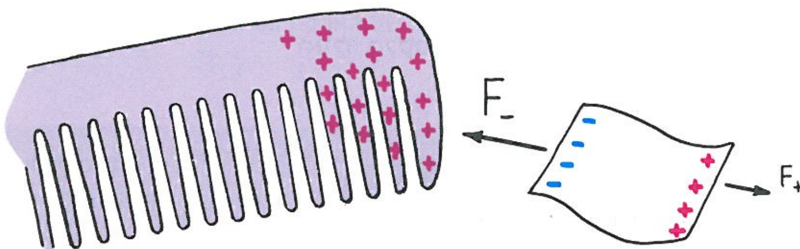
* במהלך ביצוע הניסוי, נזהר בנג'מין פרנקלין לבודד את עצמו מהמתקן הניסויי שלו ולעמוד מוסתר מהגשם, ולכן לא התחשמל, בניגוד לאחרים, שניסו לחזור על הניסוי שלו. בנוסף להיותו מדינאי גדול, היה פרנקלין גם מדען מהדרגה הראשונה. הוא היה הראשון שקבע את המונחים חיובי ושלילי בהקשר של מטענים חשמליים, והוא שהמציא את "תיאוריית הנוזל האחד" בחשמל. כמו כן תרם פרנקלין רבות להבנתנו את מושגי ההארקה והבידוד החשמלי. פרנקלין גם הוציא לאור עיתון, יצר את החברה הראשונה לביטוח נזקי אש, והמציא כיריים בטוחים ויעילים יותר מאלו שהיו בזמנו - אדם עסוק מאוד! רק משימה חשובה כמו נטילת חלק בעיצוב מבנה הממשל בארה"ב מנעה ממנו להקדיש עוד יותר זמן לעיסוק החביב עליו: חקירה מדעית של הטבע.



איור 21.11
האטומים או המולקולות הסמוכים לפני השטח נעשו מקוטבים חשמלית. מטעני שטח בעלי עוצמה שווה וסימן הפוך מושרים בצידו הנגדי של החומר.

והחיוביים של המולקולות מסתדרים במקביל אלה לאלה בשל ההשראה (איור 21.11), והחומר מתקטב חשמלית.

עתה נוכל להבין מדוע פיסות נייר ניטרליות נמשכות לגוף הטעון במטען חשמלי. המולקולות בנייר מתקטבות, כך שבקרבת החפץ הטעון נמצאים צידי המולקולות הטעונים במטען ההפוך. הקרבה מנצחת, ובסך הכל פועלת משיכה חשמלית על פיסות הנייר (איור 21.12). לעיתים יקרה שהן ייצמדו לגוף הטעון, ולפתע יעופו ממנו והלאה. הדחייה הזאת נוצרת, משום שפיסות הנייר נטענות, לעיתים, עקב המגע בגוף הטעון. במצב זה יהיה מטענן שווה-סימן לזה של הגוף, ותיווצר דחייה.



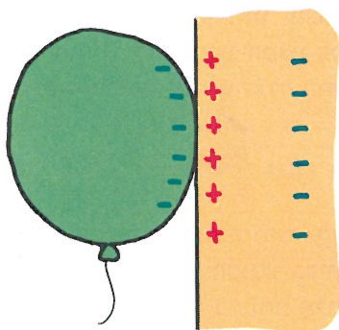
איור 21.12
מסרק טעון מושך אליו פיסת נייר לא-טעונה, מפני שכוחות המשיכה של המסרק על המטענים הקרובים יותר גדולים מכוחות הדחייה שלו על המטענים הרחוקים יותר.

שאלה

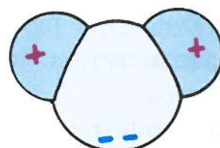
מוט הטעון במטען שלילי מובא לקרבת פיסות נייר קטנות, ניטרליות. צידן החיובי של המולקולות בנייר נמשך אל המוט, וצידן השלילי נדחה ממנו. מספר הצדדים החיוביים והשליליים שווה. מדוע, אם כן, אין כוחות המשיכה והדחייה מבטלים זה את זה?

שפשפו בשערכם בלון מנופח, והוא ייטען. הניחו את הבלון ליד הקיר, והוא ייצמד אליו. הסיבה לכך היא שהמטען שעל הבלון משרה מטען הפוך על

תשובה: הצדדים החיוביים פשוט קרובים יותר אל המוט, ולפי חוק קולון, פועל עליהם כוח חשמלי גדול יותר מזה שפועל על החלקים השליליים, הרחוקים יותר. הוא אשר אמרנו: הקרבה מנצחת. הכוח – המושך – בין המטענים השליליים שעל המוט לבין צידן החיובי של המולקולות גדול יותר, לכן פיסות הנייר יימשכו אל המוט. האם תוכלו לראות עתה כי משיכה היתה קיימת גם אילו היה המוט טעון במטען חיובי?



איור 21.13
הבלון הטעון שלילית מקטב את המולקולות שבקיר, ויוצר משטח טעון חיובית, כך שהבלון "נדבק" למשטח.

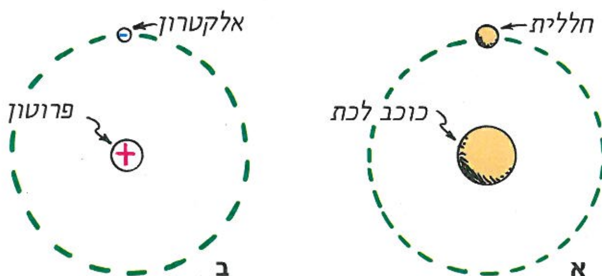


איור 21.14
מולקולת H_2O היא דו-קוטב (דיפול) חשמלי.

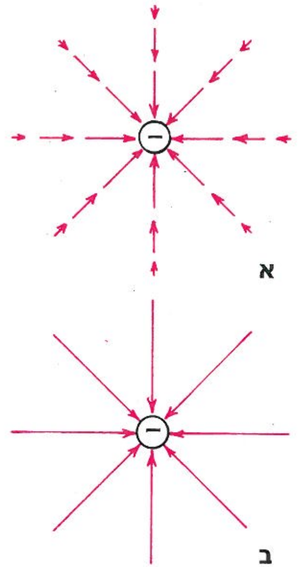
משטח הפנים של הקיר. ושוב מנצחת הקרבה - המטען על הבלון קרוב מעט יותר למטען המנוגד שהוא משרה בקיר, מלמטען ששווה בסימנו למטענו של הבלון (איור 21.13). מולקולות רבות, למשל H_2O, הן מקוטבות חשמלית במצבן הרגיל. התפלגות המטען החשמלי במולקולות אלו אינה אחידה לחלוטין. בצד אחד של המולקולה נמצא מעט יותר מטען שלילי מבצידה האחר (איור 21.14). על מולקולות כאלו אומרים שהן דו-קטבים (ובלועזית: דיפולים) חשמליים.

השדה החשמלי

כמו כוחות הכבידה, גם הכוחות החשמליים פועלים הן בין עצמים שאינם נוגעים זה בזה והן בין עצמים המצויים במגע. בשני המקרים, החשמלי כמו גם הכבידתי, קיים שדה כוח, שמשפיע על מטענים במקרה החשמלי ועל מסות במקרה הכבידתי. ניתן לומר שתכונות המרחב שמסביב לגוף בעל מסה משתנות באופן שגוף אחר שייקלע לאותו אזור יחוש בכוח הפועל עליו. "השינוי במרחב" שגורמת לו מסה נקרא שדה כבידה. לגבי כל מסה אחרת, ניתן לראותה כאילו מתרחשת פעולת גומלין בינה לבין השדה, ולא ישירות עם המסה שיוצרת אותו. לדוגמה, כאשר תפוח נופל מעץ, אנו אומרים שהוא נמשך אל מסת כדור הארץ, אבל אפשר גם לומר שמתרחשת פעולת גומלין בינו לבין שדה הכבידה של כדור הארץ. השדה ממלא תפקיד של מתווך בפעולת הגומלין שבין הגופים. מקובל לחשוב על לוויינים רחוקים, חלליות ודומיהם כאילו פועל עליהם שדה כבידה, ולא המסה של כדור הארץ ושל כל שאר הגופים שיוצרים את השדה הזה. ממש כפי שהחלל סביב כל מסה מלא בשדה כבידה, כך המרחב סביב כל מטען חשמלי מלא **בשדה חשמלי** - מעין הילה המשתרעת בחלל.



איור 21.15
כוח הכבידה מחזיק את החללית במסלול סביב כוכב הלכת (א), וכוח חשמלי מחזיק את האלקטרון במסלול סביב הפרוטון (ב). בשני המקרים אין מגע בין הגופים. אנו אומרים שבין הגופים המסתובבים לבין שדות הכוח של הכוכב ושל הפרוטון, הנמצאים בכל מקום שבו גופים אלו עוברים, מתקיימת פעולת גומלין (אינטראקציה). כך, ניתן לתאר את הכוח שמטען חשמלי אחד מפעיל על מטען אחר כתגובה של המטען השני לשדה הכוח שיוצר הראשון.



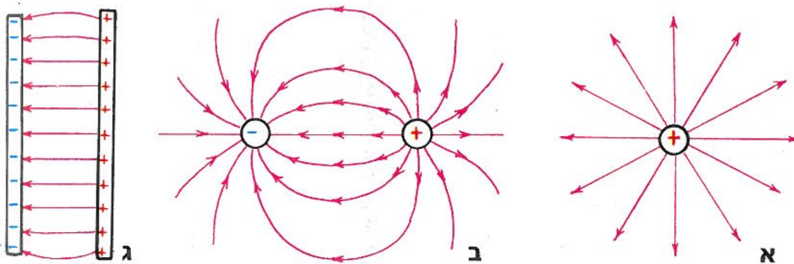
איור 21.16
שתי דרכים להצגת השדה החשמלי סביב מטען שלילי. (א) הצגה וקטורית. (ב) הצגה של קווי כוח.

לשדה חשמלי יש הן עוצמה והן כיוון. עוצמתו של השדה בכל נקודה היא, בפשטות, עוצמת הכוח ליחידת מטען המצוי בנקודה הזאת. אם מטען q חש כוח F בנקודה כלשהי במרחב, הרי שהשדה החשמלי E באותה נקודה הוא

$$E = \frac{F}{q}$$

את השדה החשמלי מסמנים באמצעות חיצי-וקטורים כמתואר באיור 21.16א. החיצים מצביעים על כיוון השדה, המוגדר ככיוון שבו היה מתחיל לנוע מטען בוחן קטן וחיובי, שהיה נותר שם במנוחה אלמלא נוכחותו של השדה*. בכל נקודה, כיוון הכוח הפועל על מטען הבוחן הוא גם כיוונו של השדה. אנו רואים באיור, שכל הווקטורים פונים לעבר מרכזו של הכדור הטעון שלילית. אילו היה הכדור טעון חיובית, היו הווקטורים מסומנים מהכדור והלאה, מפני שבמצב זה מטען בוחן חיובי היה נדחה ממרכז הכדור.

עוד דרך יעילה לתיאור שדה חשמלי היא באמצעות קווי כוח (איור 21.16ב). קווי הכוח המסומנים באיור מייצגים מספר קטן מתוך אין-ספור הקווים שאפשר לתאר בעזרתם את כיוונו של הכוח. קווים רחוקים זה מזה מציינים שדה חלש. עבור מטען יחיד, הקווים נמשכים עד אין-סוף; עבור שני מטענים מנוגדים או יותר, אנו מסמנים את הקווים כיוצאים מן המטען החיובי ומסתיימים במטען השלילי. צורות אחדות של שדות חשמליים מוצגות באיור 21.17, ותצלומים של צורות-שדה אחדות מוצגים באיור 21.18. בתצלומים נראות פיסות-חוטים זעירות, מושרות באמבט שמן המוקף במוליכים טעונים. קצות החוטים נטענים בהשראה ונוטים להסתדר בשורות קצה אל קצה, בהתאם לקווי השדה, בדומה לשבבי ברזל בשדה מגנטי.

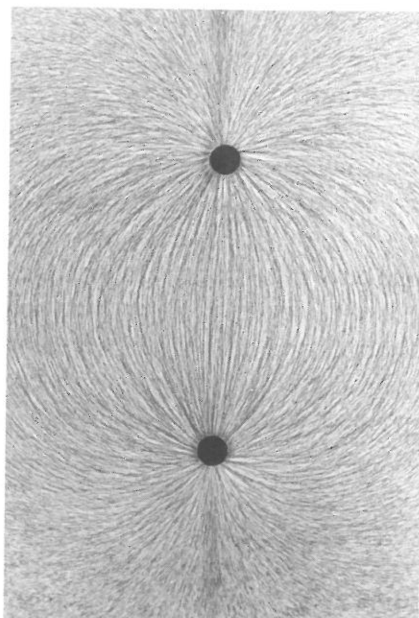


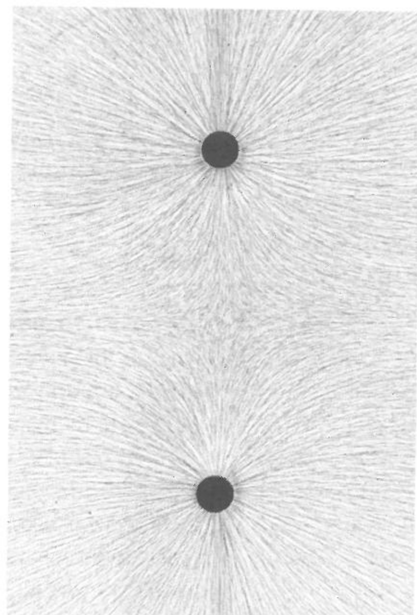
איור 21.17
צורות של שדות חשמליים. (א) קווי השדה סביב מטען חיובי בודד. (ב) קווי השדה סביב זוג מטענים שווי גודל והפוכי סימן. שימו לב שהקווים יוצאים מהמטען החיובי ומסתיימים במטען השלילי. (ג) קווי שדה אחידים בין שני לוחות מקבילים הטעונים במטענים נגדיים.

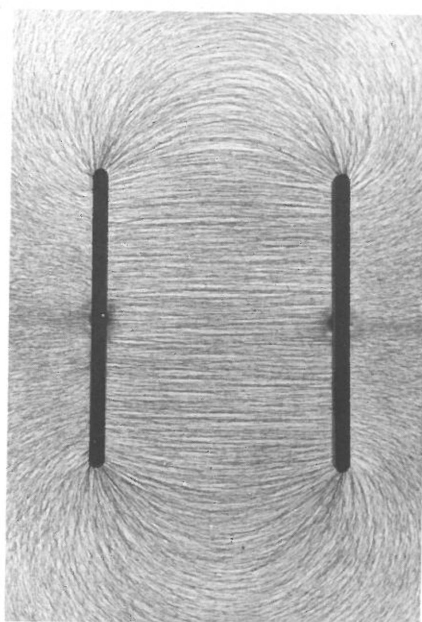
לא רק בהבנת הכוחות השוררים בין מטענים נייחים מסייע מושג השדה החשמלי, אלא גם בהבנת המתרחש כאשר מטענים שרויים בתנועה. כאשר מתרחשת תנועת מטען, המטענים השכנים "יודעים" על כך עקב שינויים החלים בשדה החשמלי. שינויים אלה יוצאים מהמטענים המואצים ומתקדמים

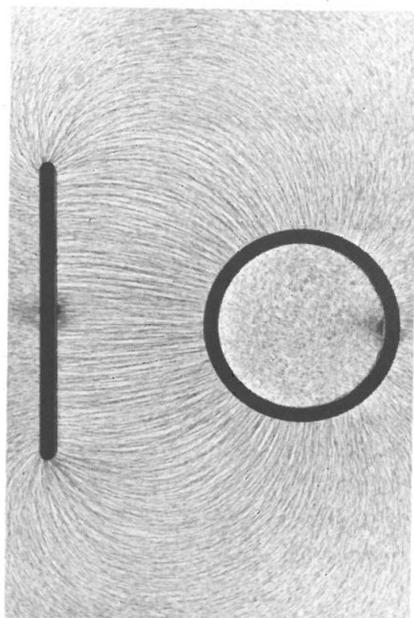
* מטען הבוחן הוא קטן, כך שהשדה החשמלי שהוא עצמו יוצר קטן יחסית לשדה שאותו הוא בוחן. אילו היה מטען הבוחן גדול, הוא היה משנה את התפלגות המטען במקורות השדה שאותו אנו רוצים למדוד. זיכרו כי כאשר למדנו את נושא החום, נתקלנו בדרישה דומה - הדרישה לתרמומטר בעל מסה קטנה לשם מדידת טמפרטורה של מסה גדולה יותר.

איור 21.18
פיסות חוט זעירות, המרחפות באמבט שמן מסביב למוליכים טעונים, מסתדרות לאורך קווי השדה. (א) מטענים שווי גודל וסימן. (ב) מטענים שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם. (ג) לוחות טעונים במטענים מנוגדים. (ד) גליל ולוח טעונים במטענים מנוגדים.


א


ב


ג


ד

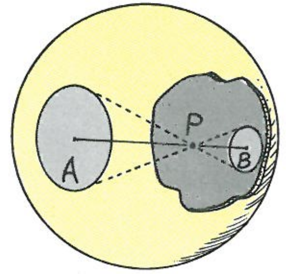
במהירות האור. בהמשך נלמד, כי השדה החשמלי הוא מאגר של אנרגיה, וכי ניתן להוביל אנרגיה למרחקים ארוכים בשדה חשמלי. את השדה ניתן להנחות באמצעות תילי מתכת ולהעבירו דרכם, וכן אפשר להעבירו בחלל הריק. נחזור לרעיונות אלה בפרק הבא, ובהמשך, כאשר נלמד על קרינה אלקטרומגנטית.

מיסוך חשמלי

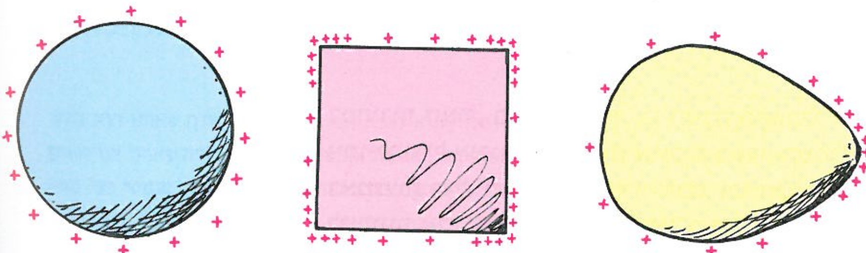
הבדל חשוב בין שדה חשמלי לשדה הכבידה הוא ששדות חשמליים ניתן למסך באמצעות חומרים שונים, ואילו שדות כבידה אינם ניתנים למיסוך מעין זה. מידת המיסוך מאפיינת את החומר הממסך. באוויר, למשל, עוצמת השדה החשמלי שנוצר בין שני מטענים קטנה אך במעט בהשוואה לעוצמתו בריק. לעומת זאת, אם יימצא שמן בין המטענים, השדה יקטן בכשמינית מערכו. מתכת תמסך את השדה החשמלי לגמרי.

תארו לעצמכם, למשל, מטען חשמלי על פני כדור מתכת חלול. בשל הדחיות ההדדיות שבין המטענים, הם יתפזרו באופן אחיד על פני הקליפה הכדורית. במצב זה המרחקים שבין המטענים הם מרביים, ולכן הדחייה ביניהם תהיה מזערית. קל לראות, שהכוח החשמלי על מטען בוחן הממוקם בדיוק במרכז חלל הקליפה יתאפס, מפני שהכוחות הפועלים עליו בכיוונים מנוגדים יאזנו זה את זה לגמרי. מעניין לציין שביטול מלא של הכוחות מתקיים בכל מקום בפנים הקליפה המוליכה ולא רק במרכזה. כדי להבין מדוע, יש לאמץ מעט את המחשבה, להיזכר בחוק הריבוע ההופכי, ולהשתמש במעט גיאומטריה. נתבונן, למשל, במטען הבוחן בנקודה P באיור 21.19, שמרחקה מצידו השמאלי של הכדור כפול ממרחקה מצידו הימני. אם הכוח החשמלי בין מטען הבוחן למטענים האחרים תלוי רק במרחק, הרי שמטען הבוחן יימשך לצד שמאל בכוח קטן פי ארבעה מן הכוח שבו יימשך לצד ימין. (זיכרו את חוק הריבוע ההופכי: פירושו של מרחק גדול פי שניים הוא $\frac{1}{4}$ הכוח, מרחק גדול פי שלושה פירושו $\frac{1}{9}$ הכוח, וכך הלאה.) אולם הכוח תלוי גם בכמות המטען. באיור ניתן להבחין, שהזווית המרחבית שיוצאת מהנקודה P מכסה בצידו השמאלי של הכדור שטח (A) גדול פי ארבעה מהשטח שמכסה אותה הזווית בצד ימין (B). הדבר אינו תלוי בגודלה של הזווית. לכן, בכל זווית שהיא, על השטח A יהיה מטען גדול פי 4 מהמטען שעל השטח B. ומכיוון ש-$\frac{1}{4}$ של 4 הוא 1, מטען בוחן בנקודה P ירגיש כוח משיכה שווה לשני הכיוונים - הכוחות מתבטלים. במעט מחשבה נוספת תיווכחו שהכוחות מתבטלים בכל נקודה בתוך המוליך. (זיכרו טיעון דומה שהצגנו בפרק 8, כאשר למדנו על התבטלות הכבידה בתוך כוכב חלול.)

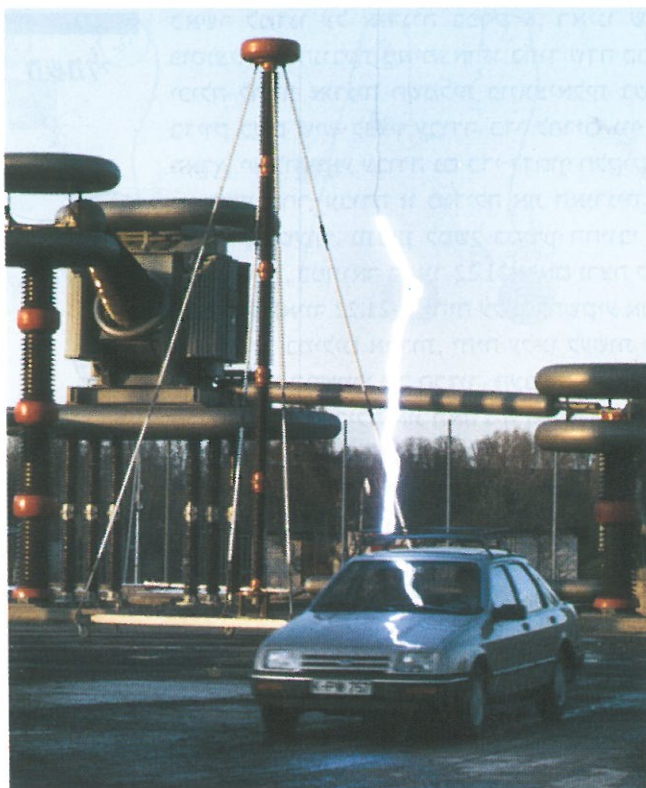
אם המוליך אינו כדורי, פיזור המטען על פניו לא יהיה אחיד. פיזור המטען על פני מוליכים בעלי צורות שונות מוצג באיור 21.20. רוב המטענים על קובייה מוליכה, למשל, דוחים זה את זה אל הפינות. העובדה המעניינת היא שהמטענים על פני מוליך יתחלקו תמיד באופן כזה, שהשדה החשמלי בכל מקום בתוך המוליך יתאפס בדיוק. אפשר לראות זאת גם באופן הבא: אילו היה שדה חשמלי בתוך המוליך, הרי שאלקטרונים חופשיים, המצויים בכל מקום



איור 21.19
מטען הבוחן בנקודה P נמשך אל המטענים הרבים והרחוקים הנמצאים ב-A בכוח השווה בדיוק לזה שבו הוא נמשך אל מעט המטענים הקרובים שב-B. סך כל הכוחות הפועלים על מטען בוחן בתוך כדור טעון הוא אפס, ולפיכך השדה החשמלי בתוך המוליך הטעון גם הוא אפס.



איור 21.20
המטענים מפוזרים על פניהם של מוליכים טעונים באופן שהשדה החשמלי בתוכם הוא תמיד אפס.



איור 21.21
אלקטרונים מהבזק הברק דוחים זה את זה אל פני השטח המתכתיים של המכונית. אף שהשדה החשמלי שהם יוצרים מחוץ למכונית עלול להיות גדול מאוד, השדה החשמלי בתוך המכונית הוא אפס.

בתוך המוליך, היו מתחילים לנוע. עד היכן ינועו? עד להיווצרות שיווי משקל, כלומר: כאשר האלקטרונים יתחלקו כך שייווצר שדה אפס בתוך המוליך.

איננו יכולים למסך את עצמנו מהכבידה, מפני שהיא מתבטאת במשיכה בלבד. לא קיימת דחייה כבידתית המסוגלת לבטל את משיכת הכבידה. מיסוך של שדות חשמליים, לעומת זאת, הוא פשוט למדי. הקיפו את עצמכם - או כל דבר שברצונכם למסך - מכל עבר במשטח מוליך. שימו את המוליך הזה בתוך שדה חשמלי, בכל עוצמה שתחפצו. המטענים החשמליים בתוך המשטח המוליך יסתדרו כך שכל תרומות השדה בפנים יבטלו זו את זו. זו הסיבה שבגללה רכיבים אלקטרוניים מסוימים נתונים בקופסאות מתכת, ושבגללה לכבלים מסוימים יש ציפוי מתכת - כדי למסכם מכל פעילות חשמלית המתרחשת מחוצה להם.

שאלה

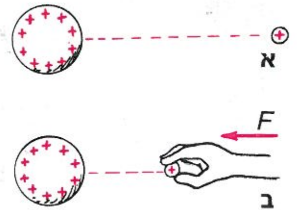
באיור 21.18 ממחישות פיסות חוט מסודרות את כיוון קווי השדה. אך החוטים אינם מסודרים בתוך הגליל שבאיור 21.18ד. מדוע?

תשובה:

השדה החשמלי ממוסך בתוך הגליל (הנראה כמעגל בתמונה הדו-ממדית). לכן החוטים שבתוכו אינם מסודרים. השדה החשמלי בתוך כל מוליך הוא אפס. היוצא מן הכלל היחיד הוא כאשר עובר במוליך זרם חשמלי.

פוטנציאל חשמלי

כאשר למדנו על אנרגיה בפרק 6, ראינו שלגוף יכולה להיות אנרגיה פוטנציאלית הנובעת מהימצאותו בתוך שדה כבידה. בדומה לכך, לחפץ טעון יכולה להיות אנרגיה חשמלית פוטנציאלית בשל היותו בתוך שדה חשמלי. בדיוק כשם שיש לבצע עבודה כדי להרים גוף כבד בשדה הכובד של כדור הארץ, יש להשקיע עבודה גם כדי לדחוף חלקיק טעון נגד השדה החשמלי של גוף טעון אחר. עבודה זו מגדילה את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של החלקיק הטעון*. נתבונן למשל במטען החיובי הקטן המצוי במרחק מסוים מכדור טעון, כמתואר באיור 21.22א. אם נרצה לדחוף את המטען ולקרב אותו אל הכדור (איור 21.22ב), יהיה עלינו להשקיע אנרגיה כדי להתגבר על הדחייה החשמלית. במילים אחרות, יהיה עלינו לעשות עבודה כדי לדחוף את המטען כנגד השדה החשמלי של הכדור. העבודה שנעשתה בהזזת המטען הקטן לעבר הכדור הטעון הגדילה את האנרגיה הפוטנציאלית של המטען הקטן. לאנרגיה שיש עתה למטען בגין המקום שבו הוא נמצא אנו קוראים **אנרגיה פוטנציאלית חשמלית**. אם ישוחרר המטען, הוא יואץ מן הכדור והלאה, והאנרגיה הפוטנציאלית שלו תהפוך לאנרגיה קינטית.



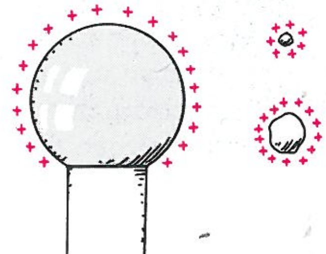
איור 21.22
למטען הקטן אנרגיה פוטנציאלית רבה יותר במצב (ב) מבמצב (א), מפני שנדרשה עבודה כדי לקרבו לעבר המטען הגדול.

אם נדחף לאותה נקודה שני מטענים ולא אחד, הרי שיהיה עלינו לעשות עבודה כפולה, ולשני המטענים באותו המקום תהיה אנרגיה פוטנציאלית חשמלית כפולה. שלושה מטענים שווים יהיו בעלי אנרגיה פוטנציאלית חשמלית גדולה פי שלושה, לעשרה מטענים שווים תהיה אנרגיה גדולה פי עשרה, וכך הלאה. במקום לעסוק באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית השונה מגוף טעון אחד למשנהו, לעיתים קרובות נוח יותר לדון באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית ליחידת מטען. פשוט מחלקים את כמות האנרגיה בכמות המטען. למשל: עשרה מטענים שעומדים במקום מסוים יתרמו למערכת אנרגיה גדולה פי עשרה מזו שיתרום חלקיק אחד באותו מקום, אבל אז גם המטען יהיה גדול פי עשרה; וכך אנו מוצאים, שכמות האנרגיה ליחידת מטען מאפיינת את המקום שבו המטען נמצא, ואין זה משנה מה שיעורו של המטען הנמצא שם. המושג אנרגיה חשמלית ליחידת מטען נקרא **פוטנציאל חשמלי**, כלומר:

$$\text{פוטנציאל חשמלי} = \frac{\text{אנרגיה פוטנציאלית חשמלית}}{\text{כמות מטען}}$$

היחידה שבה מודדים פוטנציאל חשמלי היא הוולט. פוטנציאל חשמלי של וולט אחד שווה לג'ול אחד (ג') של אנרגיה לקולון (ק') אחד של מטען.

$$1\ \text{וולט} = \frac{1\ \text{ג'ול}}{1\ \text{קולון}}$$

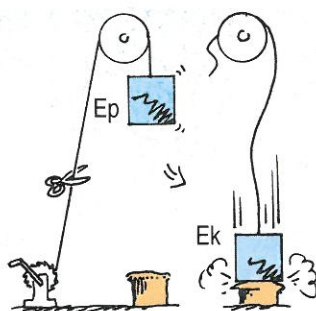


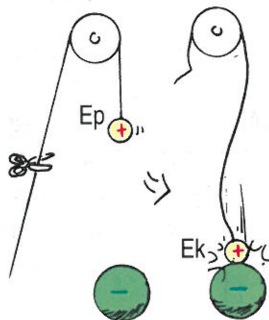
איור 21.23
למטען הבוחן הגדול אנרגיה פוטנציאלית רבה יותר בשדה החשמלי של הכיפה הטעונה, אך הפוטנציאל החשמלי באותה נקודה אינו משתנה.

הבדל הפוטנציאלים החשמליים בין שתי נקודות נקרא מתח חשמלי, או בפשטות - המתח שבין שתי הנקודות. גם המתח, כמובן, נמדד בוולטים. לפיכך, סוללה של 1.5 וולט נותנת 1.5 ג'ול אנרגיה על כל קולון של מטען שעובר דרכה.

---

* עבודה זו היא חיובית אם היא מגדילה את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של החלקיק הטעון, ושלילית אם היא מקטינה אותה.





איור 21.24
באיור משמאל מתוארת האנרגיה הפוטנציאלית (Ep) של מסה המוחזקת בשדה הכבידה. באיור מימין מתוארת האנרגיה הפוטנציאלית של מטען המוחזק בשדה חשמלי. כאשר ישוחררו שניהם, כמה אנרגיה קינטית (Ek) יקבל כל אחד מהם ביחס לאנרגיה הפוטנציאלית שהיתה לו לפני ששוחרר?



איור 21.25
אף שהפוטנציאל של הבלון הטעון הוא גבוה, האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית נמוכה, בשל כמות המטען הקטנה שעל הבלון.

חשיבותו של מושג הפוטנציאל החשמלי היא שניתן לייחס לו ערך בכל נקודה, גם אם אין בה מטען חשמלי. כך גם ניתן לייחס פוטנציאל חשמלי לנקודות השונות לאורך מעגל חשמלי. בפרק הבא נראה, שהדק החיובי של סוללה בת 12 וולט מוחזק בפוטנציאל חשמלי הגבוה ב-12 וולט מן הפוטנציאל של ההדק השלילי. כאשר שני ההדקים מחוברים ביניהם באמצעות תווך מוליך, ינועו מטענים בתווך בין שני ההדקים בעלי הפוטנציאל השונה.

שפשפו בלון על שערכם, ועל הבלון ייווצר פוטנציאל שלילי, אולי של כמה אלפי וולטים! משמעות הדבר היא כמה אלפי ג׳ולים של אנרגיה אילו היה הבלון טעון במטען של קולון אחד. אולם, כפי שראינו, קולון אחד הוא מטען גדול. המטען האופייני שעשוי להצטבר על בלון בעקבות חיכוכו בשיער הוא בדרך כלל הרבה פחות ממיליונית הקולון. לכן, שיעור האנרגיה החשמלית שיש לייחס לבלון הטעון היא מאוד-מאוד קטנה. פוטנציאל גבוה כרוך באנרגיה גבוהה רק אם הוא מלווה במטען גדול. כאן ניכר ההבדל המהותי שבין אנרגיה פוטנציאלית חשמלית לבין פוטנציאל חשמלי.

שאלות

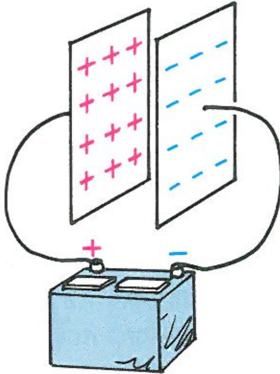
1. אילו היה מטען הבוחן שבאיור 21.24 כפול בגודלו (כלומר בעל מספר כפול של קולונים), האם היתה האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית שלו ביחס לכדור הטעון נשארת ללא שינוי, או גדלה כפליים? האם היה הפוטנציאל החשמלי של מטען הבוחן נותר ללא שינוי, או שמא הוא היה גדל פי שניים?
2. מהי משמעות האמירה כי במכונית יש "מצבר של 12 וולט"?

תשובות:

1. אם גודל המטען כפול (פי שניים קולונים), למטען הבוחן תהיה אנרגיה כפולה. זאת, משום שתידרש עבודה כפולה כדי להביא את מטען הבוחן למקומו. אך הפוטנציאל החשמלי לא ישתנה. זאת, מאחר שהפוטנציאל החשמלי מאפיין את המקום במרחב, בלי קשר לכמות המטען. אנרגיה פוטנציאלית חשמלית היא מושג שונה מפוטנציאל חשמלי. כדאי לוודא שהבנתם את ההבדלים ביניהם לפני שתעברו להמשך.
2. פירוש הדבר הוא שלהדק האחד של המצבר פוטנציאל חשמלי גבוה ב-12 וולט מלהדק האחר. בפרק הבא נראה כי משמעות הדבר היא גם שכל קולון של מטען העובר במעגל המחבר את שני ההדקים, יקבל מהמצבר 12 ג׳ולים של אנרגיה כשיעבור דרכו.

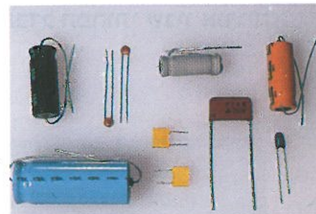
אגירת אנרגיה חשמלית

ניתן לאגור אנרגיה חשמלית בהתקן נפוץ הקרוי **קבל**, המצוי כמעט בכל מעגל אלקטרוני. קבלים משמשים כמתגים הצורכים אנרגיה מועטת בלוחות אם של מחשבים, וכהתקני אגירה לכמויות גדולות יותר של אנרגיה במבזקים של מצלמות. בהתקנים אלו האנרגיה משוחררת במהירות במשך הזמן הקצר של ההבזק. באופן דומה, אך בקנה מידה גדול בהרבה, נאגרות כמויות אדירות של אנרגיה חשמלית במערכים של קבלים המספקים אנרגיה להפעלת לייזרים ענקיים במעבדות גדולות.



איור 21.26
קבל מורכב משני לוחות מקבילים וסמוכים זה לזה. כאשר הוא מחובר לסוללה, הלוחות נטענים במטענים שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם. המתח בין הלוחות שווה למתח בין הדקי הסוללה.

הקבל הפשוט ביותר אינו אלא זוג של לוחות מוליכי חשמל, המופרדים זה מזה מרחק קצר. כאשר הלוחות מחוברים להתקן טעינה, כדוגמת הסוללה שבאיור 21.26, מטען מועבר מלוח אחד למשנהו. הדבר מתרחש כאשר ההדק החיובי של הסוללה מושך אלקטרונים מהלוח שאליו הוא מחובר. אלקטרונים אלו נשאבים, למעשה, דרך הסוללה, ודרך ההדק הנגדי, אל תוך הלוח שממול. לוחות הקבל טעונים אז במטענים שווים בגודלם ומנוגדים בסימנם - הלוח הטעון במטען חיובי מחובר להדק החיובי של הסוללה, ואילו הלוח הטעון במטען שלילי מחובר להדק השלילי. הטעינה מסתיימת כאשר הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות משתווה להפרש הפוטנציאלים שבין הדקי הסוללה, שהוא מתח הסוללה. ככל שמתח הסוללה גדול יותר, וככל שהלוחות גדולים יותר וקרובים יותר זה לזה, כך גדולה יותר כמות המטען שניתן לאגור בקבל. באופן מעשי, הלוחות עשויים להיות יריעות מתכת דקות, המופרדות ביניהן בשכבת נייר דקיקה. "כריך הנייר" הזה מגולגל לצורת גליל קטן כדי לחסוך במקום. קבל שימושי כזה נראה, יחד עם קבלים אחרים, באיור 21.27. (על תפקידיהם של קבלים במעגלים חשמליים נלמד בפרק הבא.)



איור 21.27
דוגמאות של קבלים שבשימוש.

שאלה מהו מטענו החשמלי הכולל של קבל טעון?

תשובה: המטען הכולל על קבל טעון הוא אפס, מכיוון שהמטען על כל אחד מלוחותיו שווה בגודלו והפוך בסימנו למטען שעל הלוח האחר. אם, למשל, פורקים את הקבל בכך שמאפשרים למטענים לעבור מהלוח האחד ללוח האחר, גם אז המטען על הקבל הוא אפס, משום שבמקרה כזה המטען הכולל על כל אחד מלוחותיו הוא אפס.

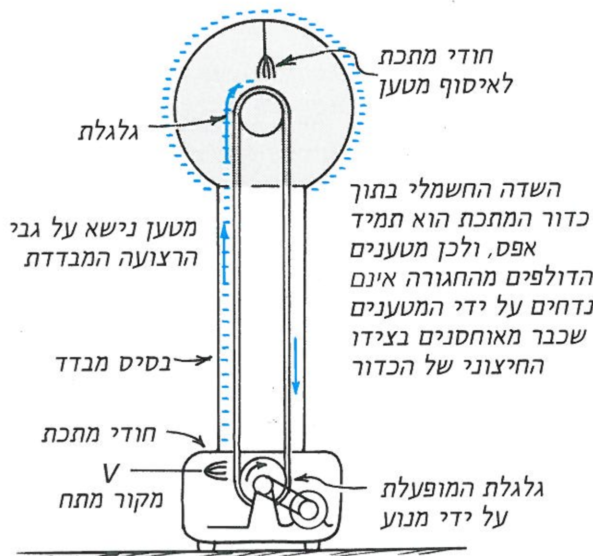
קבל טעון עובר התפרקות כאשר נוצר קשר מוליך בין שני הלוחות. פריקה של קבל עשויה להיות חוויה מהממת אם חלילה יזדמן לכם להיות בעצמכם הקשר המוליך. מעבר האנרגיה המתרחש עלול להיות קטלני אם הקבל טעון במתח גבוה, כדוגמת המתח שבמכשירי הטלוויזיה, גם אם המכשיר כבוי. זו הסיבה העיקרית לפתקי האזהרה על מכשירים כאלה.

מקור האנרגיה המאוחסנת בקבל הוא בעבודה הנדרשת כדי לטעון אותו. האנרגיה אגורה בשדה החשמלי שבין לוחות הקבל. השדה החשמלי בין לוחות מקבילים הוא שדה אחיד, כמתואר באיורים 21.17ג ו-21.18ג בעמודים הקודמים. ניתן איפוא לראות את האנרגיה האצורה כאנרגיה המצויה בשדה החשמלי.

שדות חשמליים הם מאגרי אנרגיה. בפרק הבא נראה שניתן להוביל אנרגיה למרחקים ארוכים באמצעות שדות חשמליים, שניתן לכוונם ולהנחותם באמצעות תילי מתכת, או לחלופין להנחותם ישירות בחלל הריק. בפרק 24 נראה כיצד אנרגיה מהשמש מגיעה אלינו באמצעות קרינה של שדות חשמליים ומגנטיים. אכן, לעובדה שבשדות חשמליים אצורה אנרגיה יש השלכות מרחיקות לכת.

מחולל ון-דה-גראף

מכשיר מעבדה מקובל ליצירת מתח חשמלי גבוה הוא מחולל ון-דה-גראף. זוהי אחת ממכונות הברקים שבה השתמשו מדענים מטורפים בסרטי מדע בדיוני ישנים. דגם פשוט של מחולל ון-דה-גראף מתואר באיור 21.28. כדור מתכת גדול וחלול ניצב על גבי בסיס גלילי מבדד. בתוך הבסיס נמצאת רצועת גומי המונעת על ידי מנוע. הרצועה עוברת ליד שורת סיכות מתכת דמוית מסרק המוחזקת בפוטנציאל חשמלי גבוה. חודי הסיכות הטעונות האלה מספקים לחגורה מטען באופן רצוף. מטען זה נישא אל תוך המוליך החלול. הואיל והשדה



איור 21.28
דגם פשוט של מחולל ון-דה-גראף.

החשמלי בתוך המוליך הוא אפס, המטען זורם אל חודי מתכת זעירים המצויים שם (מעין קולטי ברקים קטנים, בחלקו העליון של האיור), ומגיע אל צידה הפנימי של הקליפה הכדורית. מטען סטטי מצטבר תמיד בחלקם החיצוני של מוליכים, ולכן פנים הכדור מתרוקן ללא הרף ממטענו ומוכן לקלוט מטען נוסף שהחגורה מובילה אליו. התהליך רציף, והמטען המצטבר יוצר פוטנציאל חשמלי גבוה ביותר: הוא עשוי להגיע למיליוני וולטים.

ניתן להגדיל את הפוטנציאל החשמלי של קליפה כדורית ברדיוס של מטר אחד עד 3 מיליון וולט בטרם תתרחש פריקה של המטען דרך האוויר (זאת מכיוון שהשדה החשמלי שבו מתרחשת פריצה באוויר הוא כשלושה מיליון וולט למטר). ניתן להגדיל עוד את המתח אם הקליפה הכדורית גדולה יותר, או אם מכניסים את המתקן כולו למכל גז בלחץ גבוה. מחוללי ון-דה-גראף מסוגלים ליצור מתחים גבוהים עד כדי 20 מיליון וולט. מתחים גבוהים אלה משמשים להאצתם של חלקיקים טעונים, ואלו יכולים לחדור לתוך גרעיני אטומים. נגיעה במחולל ון-דה-גראף עשויה להיות חוויה מסמרת שיער (איור 21.29).



איור 21.29
הן הנערה והן הכיפה העגולה של מחולל ון-דה-גראף טעונים עד למתח גבוה. מדוע סומרות שערותיה?

תקציר מונחים

אלקטרוסטטיקה תחום בפיסיקה העוסק בחקר מטענים חשמליים השרויים במנוחה (בניגוד למטענים בתנועה במעגלים חשמליים).

קבל התקן המשמש לאגירת מטען חשמלי. בצורתו הפשוטה ביותר הקבל עשוי משני לוחות מוליכים המופרדים זה מזה מרחק קטן.

חוק קולון הכוח החשמלי השורר בין שני מטענים המצויים במרחק מסוים זה מזה הוא:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{d^2}$$

אם המטענים הם בעלי סימן שווה, הכוח הוא כוח דחייה, ואם סימנם שונה, הכוח הוא כוח משיכה.

קולון היחידה למדידת מטען חשמלי במערכת היחידות הבינלאומית SI. סימנו ק׳. קולון אחד שווה למטען הכולל של 6.25×10^{18} אלקטרונים.

מוליך כל חומר שמטען חשמלי זורם דרכו בקלות כאשר הוא נתון להשפעתו של שדה חשמלי חיצוני.

מבדד כל חומר שמתנגד לזרימת מטען דרכו.

מוליך למחצה חומר, כמו צורן או גרמניום גבישיים, שהינו מוליך גרוע, אך ניתן להפכו למוליך טוב יותר על ידי הוספת סיגים מסוימים או אנרגיה.

טעינה במגע העברתו של מטען מגוף אחד למשנהו על ידי מגע פיסי בין שני הגופים.

טעינה בהשראה שינוי המטען של גוף מוארק, שנגרם בשל קרבתו אל גוף טעון אחר, אך מבלי שנוצר מגע בין הגוף המוארק לבין הגוף הטעון.

מקוטב חשמלית מונח המתאר אטום או מולקולה שבהם המטענים מתחלקים כך שצד אחד באטום או במולקולה חיובי מעט יותר במטענו מהצד האחר.

שדה חשמלי האזור במרחב מסביב לגוף טעון שבו קיימת השפעת המטען. מסביב למטען, השדה החשמלי קטן לפי חוק הריבוע ההופכי, בדומה לשדה הכבידה. בין לוחות מקבילים שטעונים במטען מנוגד שורר שדה חשמלי אחיד. אם גוף טעון נמצא בשדה חשמלי, פועל עליו כוח.

אנרגיה פוטנציאלית חשמלית האנרגיה שיש למטען עקב מקומו בשדה חשמלי.

פוטנציאל חשמלי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית ליחידת מטען, נמדדת בוולטים. ההפרש בפוטנציאל החשמלי בין שתי נקודות נקרא מתח.

שאלות חזרה

כוחות חשמליים

1. מהו גודלו של הכוח החשמלי בין אלקטרון לפרוטון בהשוואה לגודלו של כוח המשיכה הכבידתית שביניהם?

2. מדוע הכוחות השולטים בין גופים שמימיים הם כוחות הכבידה ולא הכוחות החשמליים שביניהם?

מטענים חשמליים

3. מדוע מתבטלים הכוחות החשמליים בין כדור הארץ לירח, אך אינם מתבטלים בין אטומים הסמוכים זה לזה?

4. איזה חלק באטום טעון חיובית, ואיזה חלק טעון שלילית?

5. מה ההבדל בין מטענם של אלקטרונים באטומים של מתכת לבין מטענם באטומים של זכוכית?

6. מהו היחס בין המסות של אלקטרון, פרוטון וניטרון?

7. מהו היחס הרגיל בין מספר הפרוטונים בגרעינו של אטום לבין מספר האלקטרונים שסובבים אותו?

שימור מטען

8. מהו יון חיובי? מהו יון שלילי?

9. איזה מטען מקבל גוף אם אלקטרונים נתלשים ממנו?

10. למה הכוונה באמירה שהמטען משתמר?

11. למה הכוונה בביטוי קוונטיזציה של מטען?

12. מה גודלה של כמות המטען הבסיסית (הקוונט הקטן ביותר של המטען)?

חוק קולון

13. מה היחס בין כמות המטען שנקראת קולון לבין מטען של אלקטרון?

14. במה שווה חוק קולון לחוק הכבידה של ניוטון ובמה הוא שונה ממנו?

15. כוח הכבידה בין שני גופים נמצא ביחס ישר למסותיהם. במה תלוי הכוח החשמלי בין שני מטענים?

16. כיצד משתנה הכוח החשמלי בין שני גופים טעונים, כאשר המרחק בין הגופים גדל כפליים? וכיצד משתנה הכוח אם המרחק גדל פי שלושה?

מוליכים ומבדדים

17. מדוע חומרים מתכתיים הם בדרך כלל מוליכים טובים של חום וחשמל?

18. מדוע חומרים כזכוכית וגומי הינם מבדדים טובים?

מוליכים למחצה

19. במה שונה מוליך למחצה ממוליך? במה הוא שונה ממבדד?

20. מהו טרנזיסטור, ומה הם אחדים משימושיו?

טעינה

21. מהן שלוש הדרכים הנפוצות לטעינה חשמלית של גוף?

טעינה במגע

22. תנו דוגמה לטעינה של גוף על ידי חיכוך.

23. תנו דוגמה לטעינה של עצם במגע.

טעינה בהשראה

24. תנו דוגמה לטעינתו של גוף בהשראה.

25. הסבירו מה אנו עושים כאשר אנחנו "מאריקים" גוף כלשהו?

26. מהו בדיוק ברק?

27. מהי מטרתו העיקרית של קולט הברקים? מהי מטרתו המשנית?

קיטוב מטען

28. במה שונה גוף מקוטב חשמלית מגוף טעון חשמלית?

29. מהו בדרך כלל המטען של גוף מקוטב חשמלית?

30. פיסת נייר נעשית מקוטבת בנוכחות מטען שלילי, למשל. חלקו החיובי של הנייר נמשך אל המטענים השליליים ואילו חלקו השלילי נדחה מהם. מדוע אין הכוחות הללו מבטלים זה את זה?

31. האם בלון הטעון במטען שלילי או חיובי יידבק לקיר ניטרלי?

השדה החשמלי

32. תנו שתי דוגמאות של שדות כוח שכיחים.

33. כיצד מוגדר כיוונו של השדה החשמלי?

34. כיצד מוגדר גודלו של השדה החשמלי?

מיסוך חשמלי

35. מדוע אין שדה חשמלי במרכזו של כדור מוליך טעון?

36. האם יש שדה חשמלי במקומות אחרים בתוך כדור מוליך טעון? הסבירו.

37. כאשר מטענים דוחים זה את זה ומסתדרים על פני המוליך, כיצד משפיע הדבר על תוכו של המוליך?

38. מה גודלו של השדה החשמלי בתוך מכונית הנפגעת ממכת ברק?

הפוטנציאל החשמלי

39. מה ההבדל בין אנרגיה פוטנציאלית חשמלית לבין פוטנציאל חשמלי?

40. מה קורה לאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מטען כאשר נעשית עליו עבודה חיובית?

41. מדוע גוף בעל אנרגיה חשמלית פוטנציאלית גבוהה אינו בהכרח בעל פוטנציאל חשמלי גבוה?

42. ניתן בקלות לטעון בלון עד לכמה אלפי וולטים. האם פירושו של דבר שיש לבלון כמה אלפי ג'ולים של אנרגיה? הסבירו.

אגירת אנרגיה חשמלית

43. מדוע מטענו הכולל של קבל טעון הוא אפס?

מחולל ון-דה-גראף

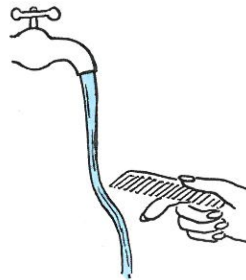
44. מהו גודלו של השדה החשמלי בתוך הכיפה הטעונה במחולל ון-דה-גראף?

45. מדוע סומר שְׂעַר ראשה של הבחורה באיור 21.29?

מטלות בית

1. הדגימו טעינה בחיכוך, ופריקה מקצוות חדים, בעזרת חבר או חברה שעומדים בצידו השני של שטיח ארוך. לכו זה לקראת זה על השטיח, כשאתם נועלים נעלי עור וגוררים את רגליכם, עד שתיפגשו אף אל אף. זו יכולה להיות חוויה מהנה ומדגדגת. הכל תלוי במידת הלחות שבאוויר (אוויר לח יקלקל את התרגיל), ו...במבנה האפים שלכם.

2. שפשפו במרץ מסרק בשיער או בבגד צמר וקרבו אותו לזרם חלש וחלק של מים. האם נטען זרם המים?



תרגילים

1. איננו חשים בכוחות המשיכה הכבידתיים בינינו לבין החפצים שסביבנו משום שכוחות אלו קטנים ביותר. לעומת זאת, כוחות חשמליים הם גדולים מאוד. בהתחשב בכך שאנו וכל הסובב אותנו עשויים ממטענים חשמליים, מדוע איננו חשים בכוחות חשמליים?

2. לעיתים קרובות נדבקים הבגדים זה לזה לאחר שיובשו במייבש הכביסה. מדוע?

3. כאשר מוציאים חליפת צמר מעטיפת הניילון לאחר הניקוי היבש, הניילון נטען במטען חשמלי חיובי. הסבירו כיצד קורה הדבר.

4. כשמסתרקים, אלקטרונים עוברים מהשיער אל המסרק. האם השיער נטען אז במטען חיובי או שלילי? ומה בדבר המסרק?

5. בכבישי אגרה בארצות שונות מקובל לשלם לשומר במטבעות. יש מקומות שבהם, לפני שהמכונית מגיעה למקום התשלום, היא נוגעת בתיל מתכתי דק. מה המטרה של סידור זה?

6. צמיגיהן של משאיות, המיועדות להובלת דלק ונוזלים מתלקחים אחרים, מיוצרים כך שיוליכו חשמל. מדוע?

7. אלקטרוסקופ הוא מכשיר פשוט, המורכב מכדור מתכת, שמחובר באמצעות מוליך לשני עלים דקים של זהב. עלים אלו נמצאים בתוך מְכַל שקוף המגן עליהם מזרימת אוויר, כמתואר באיור. כאשר גוף טעון נוגע בכדור, העלים, שבדרך כלל נמשכים מטה בכוח הכובד, מזדקפים ומתרחקים זה מזה. מדוע? (אלקטרוסקופים שימושיים לא רק לזיהוי קיומו של מטען אלא גם למדידת גודלו: ככל שהמטען גדול יותר, העלים מתרחקים זה מזה יותר.)



8. העלים של אלקטרוסקופ טעון חוזרים ומתקרבים זה לזה במשך הזמן. במקומות גבוהים יותר מעל פני הים הם נופלים מהר יותר. מדוע? (רמז: קיומן של קרניים קוסמיות התגלה לראשונה בשל תופעה זאת.)

9. האם הכרחי שהגוף הטעון ייגע ממש בכדור המתכת בשביל להפעיל את האלקטרוסקופ? נמקו.

10. מה קורה למסה של גוף שנטען במטען שלילי? ומה אם הוא נטען במטען חיובי? חישבו בקטן!

11. כיצד תוכלו לטעון גוף במטען חשמלי שלילי, אם לרשותכם רק גוף הטעון במטען חיובי?

12. קל למדי להוציא אלקטרונים הרחוקים מהגרעין של אטום גדול (כמו אורניום), ובדרך זו להפוך את האטום ליון חיובי. לעומת זאת, קשה מאוד להוציא את האלקטרונים הפנימיים. מהי, לדעתכם, הסיבה לכך?

13. כיצד משתנה הכוח החשמלי בין שני מטענים כאשר המרחק ביניהם מתקצר פי 2? כאשר הוא מתקצר פי 4? כאשר הוא גדל פי 4? (באיזה חוק מסתייעים כדי להשיב על שאלות אלה?)

14. אם מפעילים שדה חשמלי חזק דיו, גם חומר מבדד מתחיל להוליך, כפי שניתן לראות כאשר ברק עובר דרך

האוויר. הסבירו כיצד קורה הדבר, תוך התחשבות במטענים המנוגדים שמהם מורכב כל אטום, ובדרך שבה מתרחש יינון.

15. אם אתם מוצאים את עצמכם מחוץ לבית בעת סופת רעמים, מדוע לא כדאי לעמוד מתחת לעץ? האם תוכלו לחשוב על סיבה שבגללה לא כדאי לעמוד כשרגליכם רחוקות זו מזו? (רמז: חישבו על הפרש בפוטנציאל החשמלי.)

16. מדוע מוליך חשמל טוב הוא גם מוליך חום טוב?

17. אם משפשפים בלון מנופח בשיער ומצמידים אותו לדלת, מה המנגנון שגורם לו להישאר דבוק אליה? הסבירו.

18. כיצד קורה הדבר שאטומים ומולקולות ניטרליים מושכים אלה את אלה?

19. אם נשים אלקטרון ופרוטון באותו שדה חשמלי, מה יהיה היחס בין גודלי תאוצותיהם? מה יהיה היחס בין כיווני התנועה שלהם?

20. וקטור השדה של הכבידה פונה לעבר מרכז האדמה. וקטור השדה החשמלי ליד אלקטרון פונה לעבר מרכזו של האלקטרון. מדוע פונה וקטור השדה החשמלי ליד פרוטון מהפרוטון והלאה, ולא אל מרכזו?

21. מדוע מסתדרות פיסות קטנות של חוט המצויות בשדה חשמלי בכיוון קווי השדה?

22. אם משקיעים 10 ג׳ולים של עבודה כדי לדחוף מטען בן קולון אחד כנגד שדה חשמלי, מהו המתח בין נקודת הסיום לבין נקודת ההתחלה? אם משחררים אחר כך את המטען, מה תהיה האנרגיה הקינטית שלו, אם הוא יגיע חזרה לנקודת המוצא?

23. החזקת בלון טעון ביד אינה גורמת כל נזק, אף שהמתח עליו יכול להיות גבוה מאוד. האם הסיבה לכך דומה לסיבה שבגללה ניצוץ מ״זיקוק״ של עוגת יום הולדת אינו גורם כל נזק ליד שעליה הוא נוחת, אף על פי שהטמפרטורה שלו עשויה להגיע ל-1000 מעלות צלסיוס? הסבירו את תשובתכם תוך התייחסות להבדל בין פוטנציאל חשמלי לבין טמפרטורה.

24. כיצד שומרת עלינו מכונית סגורה כאשר אנו נמצאים בה באמצע סערת ברקים? נמקו.

25. האם הייתם חשים בהשפעה חשמלית כלשהי אילו נמצאתם בתוך כדור המתכת של מחולל ון-דה-גראף? נמקו את תשובתכם.

בעיות

1. שני מטענים נקודתיים נמצאים במרחק 6 ס״מ זה מזה. הכוח המושך ביניהם הוא 20 ניוטון. מה יהיה הכוח השורר ביניהם כאשר מרחקם זה מזה 12 ס״מ?

2. בדרך כלל מזניחים את כוחות הכבידה שפועלים בין פרוטונים לאלקטרונים. כדי להבין מדוע, חשבו את הכוח החשמלי ואת כוח הכבידה בין אלקטרון לפרוטון. (את המסות שלהם תמצאו בצידה הפנימי של הכריכה האחורית של הספר.)

3. חלקיק דיו במדפסת הזרקת דיו נושא מטען של 8.0×10^{-13} קולון, והוא מוסט לעבר הנייר בכוח של 3.2×10^{-4} ניוטון. מהי עוצמתו של השדה החשמלי שיוצר את הכוח הזה?

4. בשנת 1909 היה רוברט מיליקן הראשון שמדד את מטען האלקטרון בניסוי טיפות השמן המפורסם שלו. בניסוי, טיפות שמן קטנטנות מותזות לתוך שדה חשמלי אחיד בין שני לוחות טעונים במטען מנוגד. בטיפות ניתן להבחין באמצעות זכוכית מגדלת, ואת עוצמת השדה החשמלי ניתן לכוון כך שיפעיל על טיפות מסוימות כוח כלפי מעלה שישווה בדיוק בעוצמתו לכוח הכובד שפועל עליהן כלפי מטה. במצב זה תעמוד הטיפה במקומה ולא תיפול ארצה. במילים אחרות, כאשר הטיפה לכודה, הכוח שפועל כלפי מעלה qE שווה בדיוק לכוח הכובד mg. מיליקן מדד במדויק את המטען החשמלי על טיפות רבות, ומצא שהוא תמיד כפולה שלמה של 1.6×10^{-19} קולון, מטענו של האלקטרון. עבור ניסוי זה הוענק למיליקן פרס נובל. שאלות: אם טיפה בעלת מסה של 1.1×10^{-14} ק״ג נשארת יציבה במקומה כאשר השדה החשמלי שפועל עליה הוא בן 1.68×10^{5} ניוטון\קולון, חשבו: **(א)** את מטען הטיפה, **(ב)** כמה אלקטרונים עודפים יש על טיפת השמן המסוימת הזאת (השתמשו כנתון במטען האלקטרון הידוע כיום).

5. מיצאו את עליית המתח כאשר: **(א)** עבודה של 12 ג׳ול מושקעת בדחיפת מטען של 0.0001 קולון לתוך שדה חשמלי; **(ב)** 24 ג׳ולים של עבודה מושקעים בדחיפת מטען בן 0.0002 קולון לתוך אותו שדה חשמלי.